

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
ZAVOD ZA NAFTNO INŽENJERSTVO

Boris Klabučar

**Modeliranje hibridnog sustava geotermalne dizalice topline i
plinskog kotla u funkciji klimatskih parametara grada Zagreba**

Zagreb 2017.

Ovaj rad je napisan na Zavodu za naftno inženjerstvo na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, pod vodstvom doc. dr. sc. Luke Perkovića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

Popis oznaka

A_m – mjesečna potrošnja toplinske energije [kWh]

A_s – satna potrošnja toplinske energije [kWh]

Q_B – satna toplinska energija koju sustav dostavlja iznad bivalentne točke [kWh]

H_u – koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka [W/K]

E_t – toplinska energija proizvedena u godini t [kWh]

I_t – trošak investicije u godini t [HRK]

M_t – trošak održavanja sustava u godini t [HRK]

F_t – trošak goriva u godini t [HRK]

T_v – satna vanjska temperatura [°C]

T_{hout} – vanjska temperatura pri kojoj počinje grijanje prostora [°C]

T_p – projektirana temperatura grijanog objekta [°C]

T_b – temperatura bivalentne točke [°C]

Q_{hnd} – satna toplinska energija potrebna za grijanje prostora kada bi dobici bili jednaki nuli [kWh]

Q_{gas} – toplinska energija koju daje plinski kotao ispod bivalentne točke kada ne postoje dobici [kWh]

$Q_{geo.p}$ – satna toplinska energija dobivena iz geotermije paralelnog sustava [kWh]

$Q_{plin.p}$ – satna toplinska energija dobivena iz plinskog kotla paralelnog sustava [kWh]

$Q_{geo.a}$ – satna toplinska energija dobivena iz geotermije alternativnog sustava [kWh]

$Q_{plin.a}$ – satna toplinska energija dobivena iz plinskog kotla alternativnog sustava [kWh]

$Q_{geo.m}$ – satna toplinska energija dobivena iz geotermalnog monovalentnog sustava [kWh]

$Q_{plin.m}$ – toplinska energija dobivena iz plinskog kotla monovalentnog sustava [kWh]

$Q_{irr,t}$ – toplina iz dozračene sunčeve energije [kWh]

Q_R – toplinska energija preuzeta iz bušotinskog izmjenjivača [kWh]

EST – temperatura ulaznog fluida u toplinsku pumpu (*Entering source temperature, engl.*) [°C]

COP – toplinski množitelj (*Coefficient of performance, engl.*), bezdimenzionalno

$LCOE$ – Nivelirani trošak energije (*Levelized Cost of Energy, engl.*) [HRK/kWh]

E – potrošnja električne energije za rad dizalice topline [kWh]

p_e – cijena kilovat-sata električne energije [HRK/kWhe]

p_p – cijena kilovat-sat toplinske energije plina [HRK/kWht]

P – ukupni financijski trošak za energente [HRK]

HDD_s – satni stupanj-dani (*Heating degree days, engl.*) [°C-h]

HDD_m – mjesečni stupanj-dani (*Heating degree days, engl.*) [°C-mj]

x – toplinska energija preuzeta po metru bušotinskog izmjenjivača [W/m]

W – električna energija potrošena u dizalici topline [kWh]

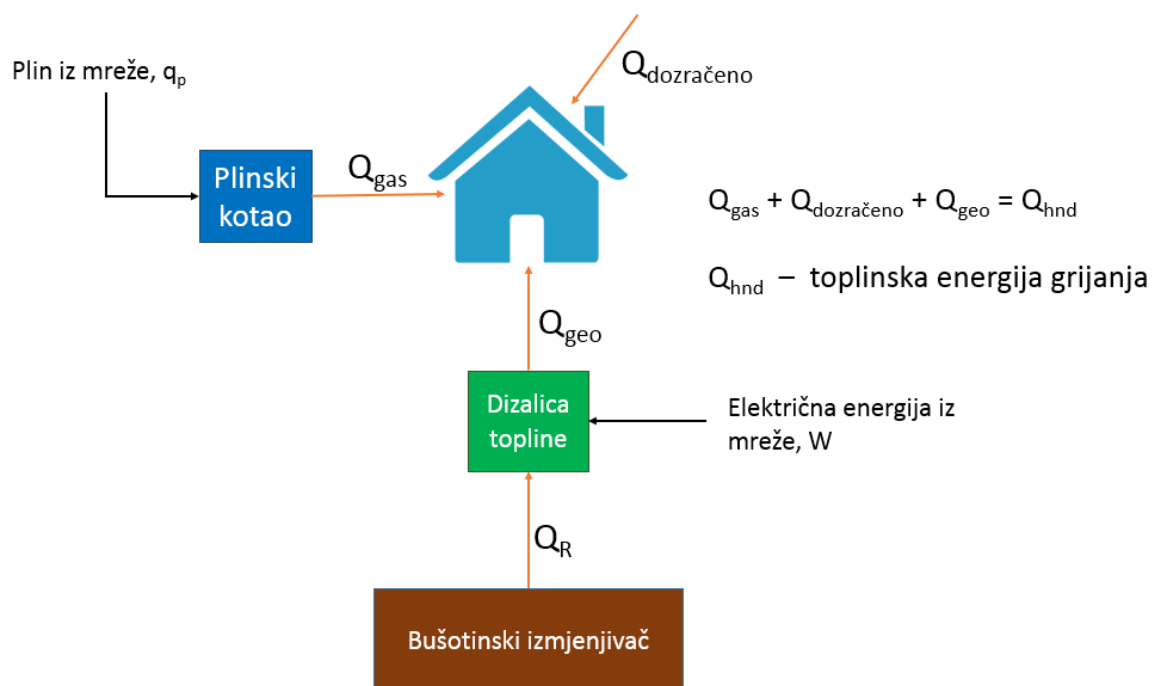
Sadržaj

Sadržaj	3
1 Uvod	1
2 Hipoteza.....	3
3 Metodologija.....	4
3.1 Arhitektonski model stambenog objekta u programu <i>AutoCAD</i>	4
3.2 Matematički model stambenog objekta u programu <i>URSA</i>	5
3.3 Proračun mjesečnih toplinskih potreba stambenog objekta u programu <i>RETScreen</i> 6	6
3.4 Opis režima grijanja.....	6
3.4.1 Monovalentni geotermalni režim.....	6
3.4.2 Monovalentni plinski režim.....	7
3.4.3 Bivalentna točka	7
3.4.4 Bivalentni paralelni režim	7
3.4.5 Bivalentni alternativni režim	8
3.5 Proračun u programu <i>MS Excel</i>	8
3.6 Proračun u programu <i>Octave</i>	12
4 Rezultati analize	14
4.1 Temperature zraka i potrošnja energije.....	14
4.2 Proizvodnja topline pojedinog sustavu prema točki bivalencije.....	16
4.3 Duljina bušotinskog izmjenjivača.....	17
5 Analiza režima grijanja.....	19
5.1 Trošak energenata za svaki režim	19
5.2 Emisije ugljičnog dioksida za svaki režim	21
5.3 LCOE analiza.....	23

6	Zaključak	26
	Popis literature	27
	Sažetak	29
	Summary	30

1 Uvod

Cilj istraživanja je bio razvoj modela za modeliranje rada hibridnog sustava grijanja za neki proizvoljno odabrani realni objekt. Objekt je zamišljen tako da se većim dijelom grije na geotermalnu energiju a manjim dijelom na plinski kotao kojim se pokrivaju toplinski gubici objekta pri vršnom opterećenju. Hibridni sustavi rade u tzv. bivalentnom režimu rada, a koji može biti paralelni i alternativni. Ovakav sustav nije tipičan za nove zgrade, ali se učestalo koristi pri obnavljanju starijih objekata s povećanim toplinskim gubicima koji su već povezani na plinsku mrežu te plin mogu koristiti kao sekundarni energent. Kao glavni parametar u regulaciji bivalentnih sustava hibridni sustav prepoznaje granicu vanjske temperature pri kojoj je potrebno uključiti sekundarni sustav grijanja, tzv. bivalentna točka ili bivalentna temperatura. Novi objekti koji nemaju priključak na plinsku mrežu mogu biti grijani isključivo geotermalnom energijom te su i takvi, tzv. monovalentni režimi rada u ovome radu modelirani i uspoređeni s hibridnim režimima grijanja. Treći režim koji ulazi u analizu je monovalentni plinski režim, gdje se objekt koji jest spojen na plinsku mrežu zagrijava isključivo plinskim kotlom. Pojednostavljeni shematski prikaz hibridnog sustava grijanja uz naznačene tokove energije prikazuje Slika 1-1.



Slika 1-1 Shematski prikaz hibridnog sustava grijanja uz naznačene tokove energije

Ovaj rad analizira utjecaj različito postavljene vrijednosti temperature bivalentne točke na ekonomsku i ekološku prihvatljivost svih analiziranih sustava. Bivalentna točka predstavlja graničnu vrijednost vanjske temperature ispod koje se način grijanja mijenja ovisno o projektiranom režimu hibridnog sustava. Postavljanje bivalentne točke ovisi o tehničkim karakteristikama objekta (površina, toplinski gubici, snaga proizvođača topline) i klimi u kojoj se objekt nalazi. Analizirani su bivalentni paralelni, bivalentni alternativni, monovalentni geotermalni i monovalentni plinski režimi grijanja. Bivalentni sustav sastoji se od dva proizvođača topline, dizalice topline i plinskog kotla koji koriste različite energente, te predstavljaju hibridni sustav grijanja. Monovalentni sustavi grijanja sastoje se od jednog proizvođača topline (dizalice topline ili plinskog kotla) te su analizirani kako bi se njihove karakteristike rada usporedile sa karakteristikama nekonvencionalnih hibridnih sustava grijanja. U ovom radu dizalica topline je spojena na bušotinski izmjenjivač koji se sastoji od tri bušotine od sto metara koje omogućuju iskorištavanje plitke geotermalne energije.

U suradnji s Državnim hidrometeorološkim zavodom prikupljeni su neobrađeni podaci temperature zraka za grad Zagreb od 1999. do 2013. godine koji su obrađeni u *MS Excelu*. Programski paketi korišteni u proračunima su: *AutoCAD*, *URSA građevinska fizika*, *RETScreen* i *MS Excel*. Obradom podataka o temperaturama dobiveni su podaci o potrebnoj godišnjoj dovedenoj toplini objektu pri kojoj bi se održavala projektna temperatura od 23°C i to uzimajući u obzir dozračenu solarnu energiju (insolaciju) kao toplinski dobitak.

U ekonomskoj analizi cijena prirodnog plina (HRK/kWh) je uzeta kao konstantna vrijednost kroz godinu. S druge strane, cijena električne energije značajno ovisi o broju potrošenih kilovat-sati, a kako se broj potrošenih kilovat-sati električne energije bitno razlikuje ovisno o režimu rada sustava za grijanje objekta, modelirana je krivulja ovisnosti cijene električne energije o potrošnji. Korišten je HEP-ov bijeli dvotarifni model za kućanstva. Analiza svakog režima napravljena je u satnoj rezoluciji u razdoblju od petnaest godina te se sastoji od: troška energenata, emisije stakleničkih plinova i niveliranog troška energije (*Levelized Cost of Energy, engl.*).

Na temu unaprjeđenja geotermalnog hibridnog sustava grijanja koristeći ugljični dioksid kao radni fluid pisao je Pei-Xue Jiang (Jiang, Zhang & Xu, 2017.) te je termodinamičku ocjenu solarno geotermalnog sustava dao José Miguel Cardemil (Cardemil, Cortés, Díaz & Escobar, 2016). Bivalentne geotermalne sustave analizirao je DiPippo (DiPippo, 2016.), dok je procjenu proizvodnje električne energije pomoću hibridnog geotermalnog sustava i pogona

na mazut obradio Qiang Liu (Liu, Shang & Duan, 2016.). Ekonomsku analizu hibridnog sustava grijanja na solar i geotermalnu energiju obradilo je Mohammad Ayub (Ayub, Mitsos & Ghasemi, 2015), dok je svjetsku analizu geotermalne energije napravio Mehmet Melikoglu (Melikoglu, 2017.). Rad na temu kemijskog tretmana stijene s ciljem poboljšavanja geotermalnog sustava napisao je Emilie Sutra (Sutra, Spada & Burgherr, 2017.), dok je analizu hibridnog geotermalnog i solarnog sustava napravio Shahid Islam (Islam & Dincer, 2017.). Korištenje napuštenih naftnih i plinskih bušotina kao izvor geotermalne energije obradio je Younes Noorollahi (Noorollahi, Taghipoor & Sajadi, 2017.), dok je rad na temu korištenja kombinirane geotermalne energije za uklanjanje soli iz vode napravio Amin Mohammadi (Mohammadi & Mehrpooya, 2017.). Procjenu termodinamičke efikasnosti geotermalnog sistema s organskim Rankine ciklusom napravio je Duygu Melek Cakici (Cakici, Erdogan & Colpan, 2017.).

Znanstveni doprinos ovog rada je analiza utjecaja odabira bivalentne točke na ekonomsku isplativost i emisije stakleničkih plinova hibridnog geotermalnog sustava grijanja i njegova usporedba s uobičajenim monovalentnim sustavima grijanja.

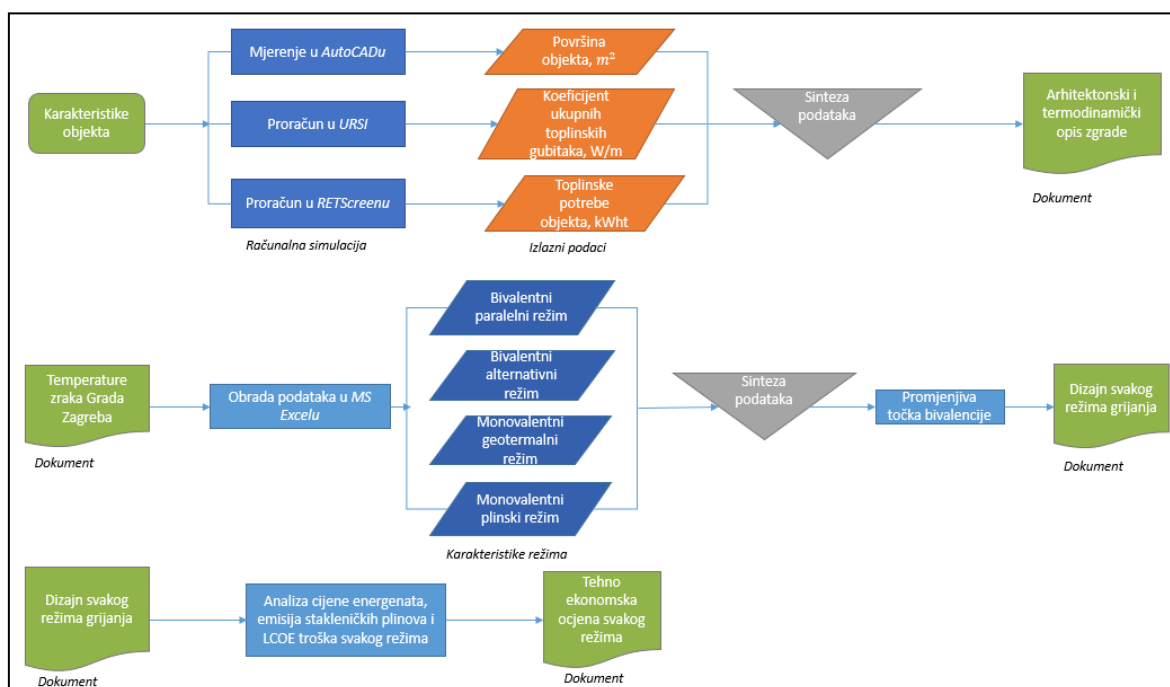
2 Hipoteza

Hipoteza ovog rada je da hibridni sustavi grijanja mogu ostvariti značajne uštede u odnosu na konvencionalne monovalentne sustave tako da se dizalica topline spojena s bušotinskim izmjenjivačem dimenzionira za zadovoljavanje bazne potrošnje toplinskom energijom dok se plinski kotao koristi kao proizvođač topline pri vršnim opterećenjima sustava. Optimiranjem odabira bivalentne točke takav sustav ima potencijal biti ekonomski jeftinije rješenje od grijanja samo na dizalicu topline ili samo na plin jer posjeduje pozitivne karakteristike oba sustava, dok u isto vrijeme smanjuje njihove nedostatke kada se primjenjuju zasebno u monovalentnom načinu rada.

Prednost grijanja na dizalicu topline spojene s bušotinskim izmjenjivačem su niski operativni troškovi električne energije koji su vezani uz rad dizalice topline. Negativna strana je visoki trošak izgradnje sustava ako ga želimo dimenzionirati za pokrivanje ukupnih toplinskih potreba objekta. Prednosti i nedostaci grijanja na plinski kotao su obrnuti, visoki operativni a niski kapitalni troškovi. Korištenjem dizalice topline za pokrivanje bazne a plinskog kotla za pokrivanje vršne potrošnje, veći dio vremena objekt će koristiti jeftinu geotermalnu energiju dok u isto vrijeme možemo uštedjeti na dimenzioniranju geotermalnog sustava jer plinom pokrивamo vršnu potrošnju koja vremenski kratko traje.

3 Metodologija

Metodologija se sastoji od nekoliko većih cjelina koje opisuje Slika 3-1.

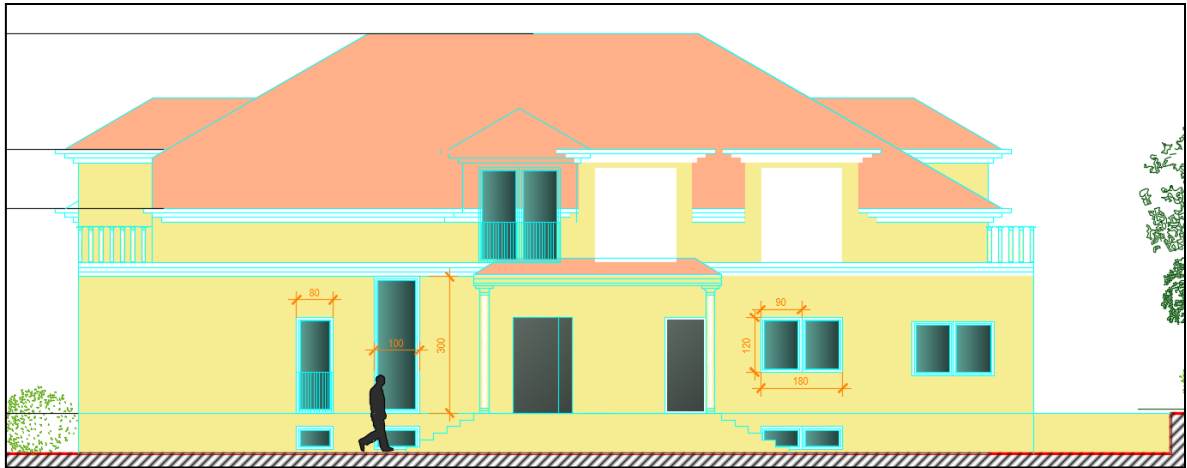


Slika 3-1 Dijagram toka kao vizualni prikaz toka istraživanja

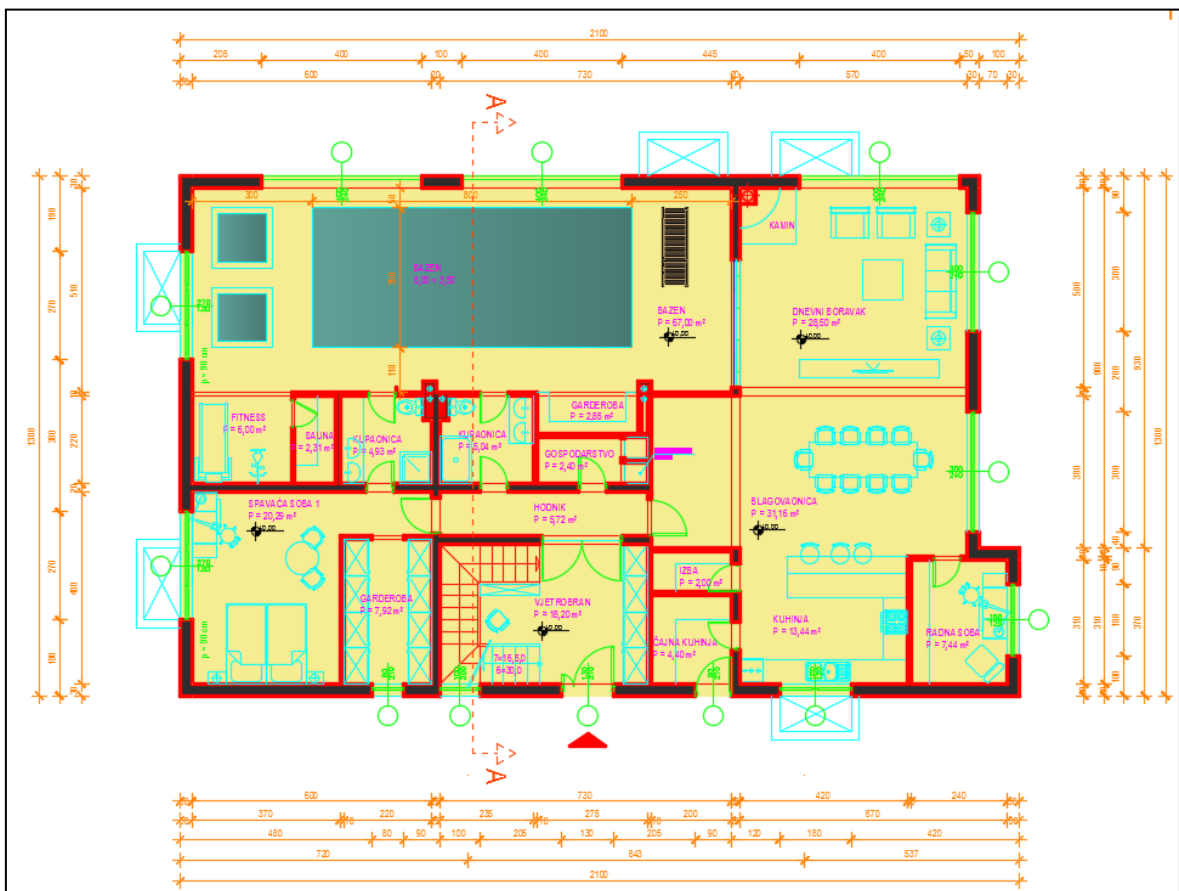
Prvo je bilo potrebno definirati arhitektonski model stambenog objekta, potom je taj model služio kao osnova za definiranje toplinskog opterećenja tog istog objekta. Dobivene toplinske potrebe na satnu razinu za jednogodišnje razdoblje predstavljaju ulazni podatak u model grijanja objekta, a koji odgovara određenom režimu rada monovalentnog ili bivalentnog hibridnog toplinskog sustava, kako je opisano u idućim poglavljima.

3.1 Arhitektonski model stambenog objekta u programu *AutoCAD*

Stambeni objekt korišten u proračunu preuzet je kao idejni projekt napravljen u programu *AutoCAD*, projektanta dipl. ing. arh. Mladena Zelenike. Radi se o stambenoj kući od 450m². *AutoCAD* je korišten u mjerenju površine stambenog prostora.



Slika 3-2 Sjeveroistočno pročelje stambenog objekta korištenog u proračunu



Slika 3-3 Tlocrt prizemlja stambenog objekta korištenog u proračunu

3.2 Matematički model stambenog objekta u programu *URSA*

Unošenjem podataka o površini objekta, korištenim građevinskim materijalima, izolatorima te njihovim toplinskim svojstvima, stvoren je matematički model kuće kojim je u programu *URSA* izračunat koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka (H_u).

3.3 Proračun mjesečnih toplinskih potreba stambenog objekta u programu *RETScreen*

RETScreen je programski alat pomoću kojeg je izračunata mjesečna toplinska potreba grijanog objekta. U *RETScreen* unosimo slijedeće podatke: minimalnu temperaturu na koju se dizajnira sustav grijanja (*Heating design temperature, engl.*), površinu grijanog objekta, koeficijent ukupnih toplinskih gubitaka (H_u), baznu potrošnju potrošne tople vode, prosječnu mjesečnu temperaturu zraka, vlažnost zraka, insolaciju, atmosferski tlak, brzinu vjetra i stupanj-dane u mjesečnoj rezoluciji (HDD_m).

3.4 Opis režima grijanja

U ovom radu obrađena su dva načina rada toplinske pumpe s obzirom na ulaznu i izlaznu temperaturu iz izmjenjivača topline u grijanom objektu (radijator, podno grijanje itd.). Opisani su slučajevi ulaza tople vode u izmjenjivač od 35°C i izlaza od 30°C, te ulaza od 45°C i izlaza od 40°C. Ovi načini rada skraćeno se zapisuju 30/35°C i 40/45°C. Sa stajališta potrošnje energenata ekonomičniji je 30/35°C no pri njegovom radu potrebni su skuplji unutarnji izmjenjivači topline koji podižu trošak početne investicije. Stoga je obrađen i 40/45°C način rada koji troši nešto više energenata no zahtijeva nižu početnu investiciju.

3.4.1 Monovalentni geotermalni režim

Monovalentni geotermalni režim je sustav grijanja u kojem dizalica topline spojena na bušotinski izmjenjivač u potpunosti podmiruje toplinske potrebe grijanog objekta. Sastoji se samo od primarnog proizvođača topline koji objekt opskrbljuje s toplom vodom za grijanje i s potrošnom toplom vodom. Ovaj sustav također može poslužiti za hlađenje prostora u ljetnim mjesecima.

Kako bi znali koliko električne energije dizalica topline troši za grijanje prostora potrebno je poznavati COP (*Coefficient of performance, engl.*) i EST (*Entering source temperature, engl.*) vrijednosti. COP predstavlja iskoristivost dizalice topline a EST temperaturu bušotinskog fluida pri izlasku iz bušotine, odnosno, ulasku u dizalicu. COP i EST vrijednosti su međusobno proporcionalne te obrnuto proporcionalne snazi s kojom dizalica topline radi u određenom trenutku. EST vrijednosti su izračunate prema eksperimentalnoj formuli koja vrijedi samo za područje grada Zagreba, dok je formula za COP dobivena korelacijom parametara službenih podataka Ecoforest dizalica topline (Kurevija, Kapuralić & Macenić,

2016). Duljina bušotinskog izmjenjivača je izračunata za svaki režim uz postavljeni uvjet da EST temperatura nikada ne pada ispod 0°C.

3.4.2 Monovalentni plinski režim

Monovalentni plinski režim je sustav grijanja u kojem plinski kotao u potpunosti podmiruje toplinske potrebe grijanog prostora, kojeg opskrbljuje s toplom vodom za grijanje i potrošnom toplom vodom. Ovaj sustav ne može poslužiti za hlađenje prostora u ljetnim mjesecima.

Iskoristivost plinskog kotla potrebna je kako bi mogli izračunati koliko plina kotao troši u održavanju sobne temperature. Pretpostavljena iskoristivost kotla na prirodni plin u ovom radu je 85%.

3.4.3 Bivalentna točka

Bivalentna točka predstavlja projektiranu graničnu vrijednost vanjske temperature ispod koje se način grijanja mijenja. Kada se bivalentni paralelni sustav nalazi ispod bivalentne točke primarni i sekundarni sustav grijanja rade paralelno, dok se kod alternativnog načina rada primarni proizvođač topline gasi i potpunu opskrbu toplinskom energijom preuzima sekundarni sustav. Kada se nalaze iznad bivalentne točke, u oba sustava radi samo primarni proizvođač topline.

3.4.4 Bivalentni paralelni režim

Bivalentni paralelni režim je hibridni način grijanja koji se sastoji od primarnog i sekundarnog proizvođača topline. Primarni proizvođač u ovom radu je toplinska pumpa spojena na bušotinski izmjenjivač a sekundarni proizvođač je plinski kotao. Postavljanjem bivalentne točke regulira se ponašanje sustava. Ukoliko vanjska temperatura zraka padne ispod zadane vrijednosti bivalentne točke, aktivira se plinski kotao te radi paralelno s toplinskom pumpom. Pri vanjskoj temperaturi zraka koja je iznad bivalentne točke, toplinska pumpa radi samostalno dok je plinski kotao isključen. Ovakav sustav je zanimljiv zbog djelomičnog pokrivanja vršnog opterećenja grijanja plinom te omogućuje uštede u projektiranju primarnog sustava grijanja, odnosno, projektiranje bušotinskog izmjenjivača manje duljine.

3.4.5 Bivalentni alternativni režim

Bivalentni alternativni režim je hibridni način grijanja koji se sastoji od primarnog i sekundarnog proizvođača topline. Ukoliko vanjska temperatura zraka padne ispod zadane vrijednosti bivalentne točke, toplinska pumpa se isključuje dok se plinski kotao aktivira i preuzima ukupne toplinske potrebe zgrade. Pri vanjskoj temperaturi zraka koja je iznad bivalentne točke toplinska pumpa radi samostalno dok je plinski kotao isključen. Ovakav sustav je zanimljiv zbog pokrivanja vršnog opterećenja grijanja plinom, te omogućuje značajne uštede u projektiranju primarnog sustava u vidu potrebne duljine bušotinskog izmjenjivača.

3.5 Proračun u programu *MS Excel*

Analiza režima grijanja započinje unošenjem satnih vanjskih temperatura za svaki mjesec, u razdoblju od 1999. do 2013. godine. Zatim se računaju satni stupanj-dani (HDD_s) s baznom temperaturom od $12,5^{\circ}\text{C}$ prema formuli:

$$HDD_s = \frac{12,5 - T_v}{24} \text{ [}^{\circ}\text{C} - h] \quad (1.1)$$

Zbrajanjem svih HDD_s u dotičnom mjesecu dobiva se stupanj-dani u mjesečnoj rezoluciji (HDD_m). *RETScreen* generira mjesečnu potrošnju toplinske energije (A_m) kako bi se grijani prostor održavao na stalnoj temperaturi od 23°C . Iz mjesečne rezolucije, formulom postotne raspodjele, računa se satna potrošnja toplinske energije (A_s). *RETScreen* uzima u obzir toplinske dobitke kroz insolaciju.

$$A_s = A_m \times \frac{T_v - T_{hout}}{\sum(T_v - T_{hout})} \text{ [kWht]} \quad (1.2)$$

Postavljanjem bivalentne točke, odredili smo u kojim se uvjetima vanjske temperature pojedini proizvođač topline pali ili gasi. Potrebno je izračunati satnu toplinsku energiju koju sustav dostavlja iznad bivalentne točke.

$$Q_B = \frac{((T_p - T_b) \times H_u)}{1000} \times 1h - Q_{irr,t} \text{ [kWht]} \quad (1.3)$$

Geotermalni paralelni bivalentni režim

Geotermalni paralelni bivalentni režim označava režim u kojem geotermalni sustav grijanja pokriva cjelokupne potrebe grijanja kada je vanjska temperatura iznad bivalentne točke. Kada vanjska temperatura padne ispod bivalentne točke aktivira se sustav grijanja plinskog kotla te dva sustava kombinirano isporučuju toplinu. Toplinska energija koju sustav treba isporučiti u paralelnom bivalentnom režimu rada iznad bivalentne točke računa se prema formuli:

$$T_v \geq T_b, \quad Q_{geo.p} = A_s \text{ [kWht]} \quad (1.4)$$

$$Q_{plin.p} = 0 \text{ [kWht]}$$

Toplinska energija koju sustav treba isporučiti u paralelnom bivalentnom režimu rada ispod bivalentne točke računa se prema formuli:

$$T_v < T_b, \quad Q_{geo.p} = Q_B \text{ [kWht]} \quad (1.5)$$

$$Q_{plin.p} = A_s - Q_B \text{ [kWht]}$$

Toplinska energija isporučena plinskim kotlom razlika je ukupne toplinske potrebe kuće (A_s) i topline isporučene geotermalnim sustavom ($Q_{geo.p}$).

Geotermalni alternativni bivalentni režim

Geotermalni alternativni bivalentni režim je sličan paralelnom režimu uz razliku da kada vanjska temperatura padne ispod bivalentne temperature, geotermalni sustav grijanja se u potpunosti gasi te cjelokupno grijanje prostora preuzima plinski kotao. Toplinska energija koju sustav treba isporučiti u alternativnom bivalentnom režimu rada iznad bivalentne točke računa se prema formuli:

$$T_v \geq T_b, \quad Q_{geo.a} = A_s \text{ [kWht]} \quad (1.6)$$

$$Q_{plin.a} = 0 \text{ [kWht]} \quad (1.7)$$

Toplinska energija koju sustav treba isporučiti u alternativnom bivalentnom režimu rada ispod bivalentne točke računa se prema formuli:

$$T_v < T_b, \quad Q_{geo.a} = 0 \text{ [kWht]} \quad (1.8)$$

$$Q_{plin.a} = A_s \text{ [kWht]} \quad (1.9)$$

Ukoliko je toplina isporučena iz geotermalnog sustava ($Q_{geo.a}$) različita od nule, toplinska pumpa radi, što znači da je u alternativnom režimu grijanja plinski kotao isključen te je toplinska energija isporučena plinskim kotlom ($Q_{plin.a}$) jednaka nuli.

Geotermalni monovalentni režim

Geotermalni monovalentni režim je režim u kojem geotermalni sustav zadovoljava cjelokupne toplinske potrebe grijanog objekta. Toplinska energija koju geotermalni sustava treba isporučiti u monovalentnom režimu rada računa se prema formuli:

$$Q_{geo.m} = A_s \text{ [kWh]} \quad (1.10)$$

Ukupnu potražnju za toplinskom energijom (A_s) u monovalentnom geotermalnom režimu rada zadovoljava geotermalni sustav ($Q_{geo.m}$).

Plinski monovalentni režim

Plinski monovalentni režim je režim u kojem plinski kotao zadovoljava cjelokupne toplinske potrebe grijanog objekta. Toplinska energija koju geotermalni sustav treba isporučiti u monovalentnom režimu rada računa se prema formuli:

$$Q_{plin.m} = A_s \text{ [kWh]} \quad (1.11)$$

Ukupnu potražnju za toplinskom energijom (A_s) u monovalentnom plinskom režimu rada zadovoljava kotao na prirodni plin ($Q_{plin.m}$).

Računanje ulazne temperature u toplinsku pumpu i COP

Kako bi izračunali potrebnu električnu energiju za pokretanje toplinske pumpe u okviru geotermalnog režima sustava grijanja potrebno je prvo izračunati temperaturu fluida koji ulazi iz bušotinskog izmjenjivača u dizalicu topline. EST (*Entering source temperature, engl.*) se računa prema eksperimentalnoj formuli za područje grada Zagreba (Kurevija, Macenić & Borović, 2017).

$$EST = -0,2514 \times x + 14,225 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1.12)$$

Kako bi se izračunao COP (*Coefficient of performance, engl.*), koriste se vrijednosti ulazne temperature fluida (*EST, engl.*) i formule dobivene korelacijom parametara službenih podataka Ecoforest dizalica topline (Kurevija, Kapuralić & Macenić, 2016).

$$\text{za } 30/35^{\circ}\text{C}, \text{COP} = (0,0044 \times \text{EST}^2) + (0,1346 \times \text{EST}) + 4,4436 \quad (1.13)$$

$$\text{za } 40/45^{\circ}\text{C}, \text{COP} = (0,0029 \times \text{EST}^2) + (0,0958 \times \text{EST}) + 3,3662 \quad (1.14)$$

Navedene formule vrijede isključivo za područje grada Zagreba.

Potrošnja električne energije dizalice topline

Kako bi izračunali stvarnu potrošnju električne energije potrebno je podijeliti dobavu toplinske energije dizalice topline i pripadajućeg COP-a.

$$E = \frac{Q_{geo}}{COP} \quad [kWhe] \quad (1.15)$$

Pojedini autori umjesto COP-a koriste stupanj iskoristivosti, η , koji je u fizikalnom smislu istovjetan pojam no u stručnoj literaturi se učestalo koristi COP ukoliko stupanj iskoristivosti prelazi 1,0.

Cijena energenata potrebnih za rad pojedinog režima

Kako se u bivalentnom režimu rada koriste dva energenta, električna struja i plin, potrebno je zbrojiti njihovu tržišnu cijenu u kilovat-satima kako bi se dobila prava cijena potrebnih energenata. Kod monovalentnih sustava potrebno je izračunati cijenu samo jednog energenta.

$$P = E \times p_e + Q_{plin} \times p_p \quad [HRK] \quad (1.16)$$

Pri kvantifikaciji energije za prirodni plin i struju korišteni su potrošeni kilovat-sati.

Proračun niveliranog troška energije, LCOE

Nivelirani trošak energije (*Levelized Cost of Energy, engl.*) pomaže nam pri procjeni pojedinog sustava s financijskog stajališta. LCOE se odnosi na sveukupne troškove i proizvedenu energiju pojedinog energetskog sustava kroz njegov pretpostavljeni radni vijek. Troškovi i proizvedena energija se diskontiranjem svode na sadašnju vrijednost kako bi se eliminirao utjecaj inflacije. Pri proračunu LCOE korištena je pojednostavljena formula (Levelized Cost of Energy, 2015)

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad [HRK/kWht] \quad (1.17)$$

Ovaj tip analize nam pokazuje jediničnu cijenu toplinske energije instaliranog sustava kroz promatrani period.

3.6 Proračun u programu *Octave*

Uvjet je da niti u jednom satu temperatura izlaznog fluida iz bušotine (ili ulaznog fluida u dizalicu topline) ne padne ispod nula stupnjeva Celzijusovih.

$$EST_t = -0,2514 \times x + 14,225 \geq 0^\circ C \rightarrow x^{max} = \frac{0 - 14,225}{-0,2514} \quad [W/m] \quad (1.18)$$

S obzirom da u ovom radu analiziramo isključivo grijanje, postavljamo dodatni uvjet:

$$Q_B = \max(Q_B, 0) \quad (1.19)$$

Neto toplinsko opterećenje grijanog objekta mora biti zadovoljeno sustavom grijanja, odnosno dobicima topline od geotermalne toplinske pumpe i plinskog kotla.

$$Q_{hnd} = Q_{geo} + Q_{gas} \quad (1.19)$$

Nakon što smo odredili za određeni sat udio topline iz plinskog bojlera Q_{gas} ili geotermalne dizalice topline Q_{geo} , možemo za svaki sat pronaći potrebnu preuzetu energiju iz izmjenjivačke cijevi x , te rezultirajući EST i COP. Poveznicu između tih varijabli nam daje zakon o održanju energije za toplinsku pumpu:

$$Q_{geo} = W + Q_R \quad (1.20)$$

Koristeći jednadžbu za COP i izraz za preuzetu energiju iz ležišta, $Q_R = x \times L$, pri čemu je L duljina izmjenjivačke cijevi, dobijemo sljedeći nelinearni sustav jednadžbi kojeg treba riješiti za svaki sat:

$$Q_{geo} \left(1 - \frac{1}{COP}\right) = \frac{x}{1000} \times L$$

$$COP = a_1 EST^2 + a_2 EST + a_3 \quad (1.21)$$

$$EST = -0,2514 \times x + 14,225$$

$$\rightarrow x = f(Q_{geo}, L, a^{COP})$$

Ako gornji sustav nema rješenja, tada je

$$LCOE = NaN$$

Također, ako je $x_t > x^{max}$

$$LCOE = NaN$$

Gornja dva uvjeta predstavljaju tehnički neizvediv slučaj (nedovoljna duljina izmjenjivačke cijevi L) i nedozvoljeno veliku preuzetu energiju po duljini metra izmjenjivačke cijevi x , a koja bi rezultirala smanjenjem EST ispod nula stupnjeva Celzijusovih.

Ukoliko gornji uvjeti nisu narušeni, s dobivenim COP_t možemo izračunati potrebno utrošenu električnu energiju za zadovoljenje $Q_{geo,t}$:

$$W = \frac{Q_{geo}}{COP} \quad (1.22)$$

Ukupno utrošenu električnu energiju, kao i ogrjevnu energiju plina možemo dobiti sumiranjem po svim satima u godini:

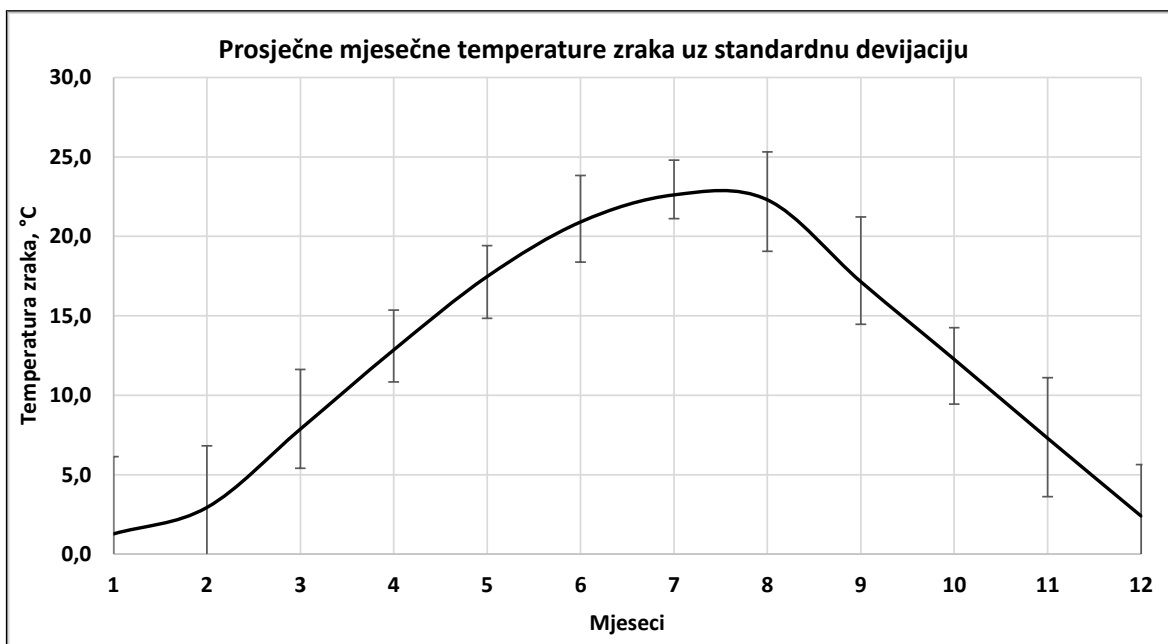
$$Q_{gas}^{TOT} = \sum_{t=1}^{8760} Q_{gas,t} \quad (1.23)$$

$$W^{TOT} = \sum_{t=1}^{8760} W_t \quad (1.24)$$

4 Rezultati analize

4.1 Temperature zraka i potrošnja energije

Ulazni podaci koji definiraju ovo istraživanje su satne vrijednosti temperature zraka za područje grada Zagreba u razdoblju od 1999. do 2013. godine, te arhitektonski i termodinamički model realnog objekta. Površina objekta je $450m^2$ s koeficijentom ukupnih toplinskih gubitaka od $560,81 \text{ W/K}$.



Slika 4-1 Prikaz mjesečnih temperatura zraka u Gradu Zagrebu od 1999. do 2013. godine

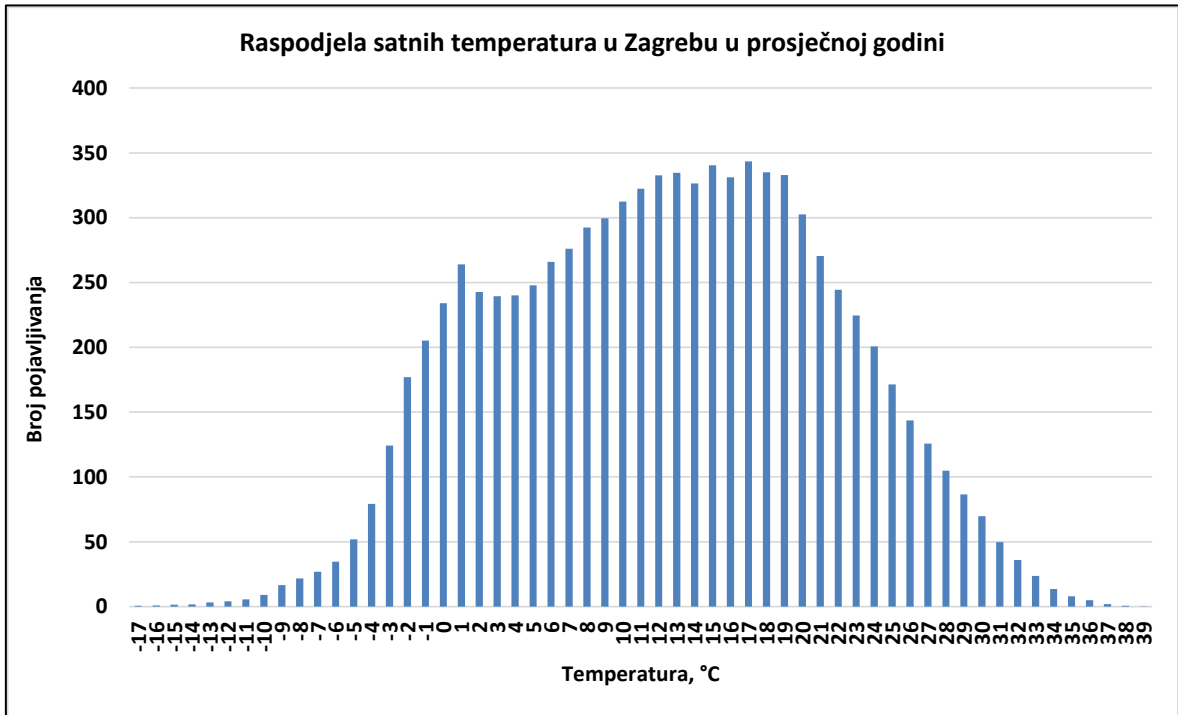
Slika 4-1 pokazuje velike oscilacije u srednjim mjesečnim vrijednostima temperature zraka u različitim godinama, zbog čega je istraživanje nužno provesti kroz duži vremenski period kako bi se kompenziralo pojavljivanje neobično toplih ili hladnih godina.

Formulom postotne raspodjele (1.2) izračunata je satna toplinska potrošnja zgrade iz mjesečne toplinske potrošnje zgrade dobivene iz programskog paketa *RETScreen*.

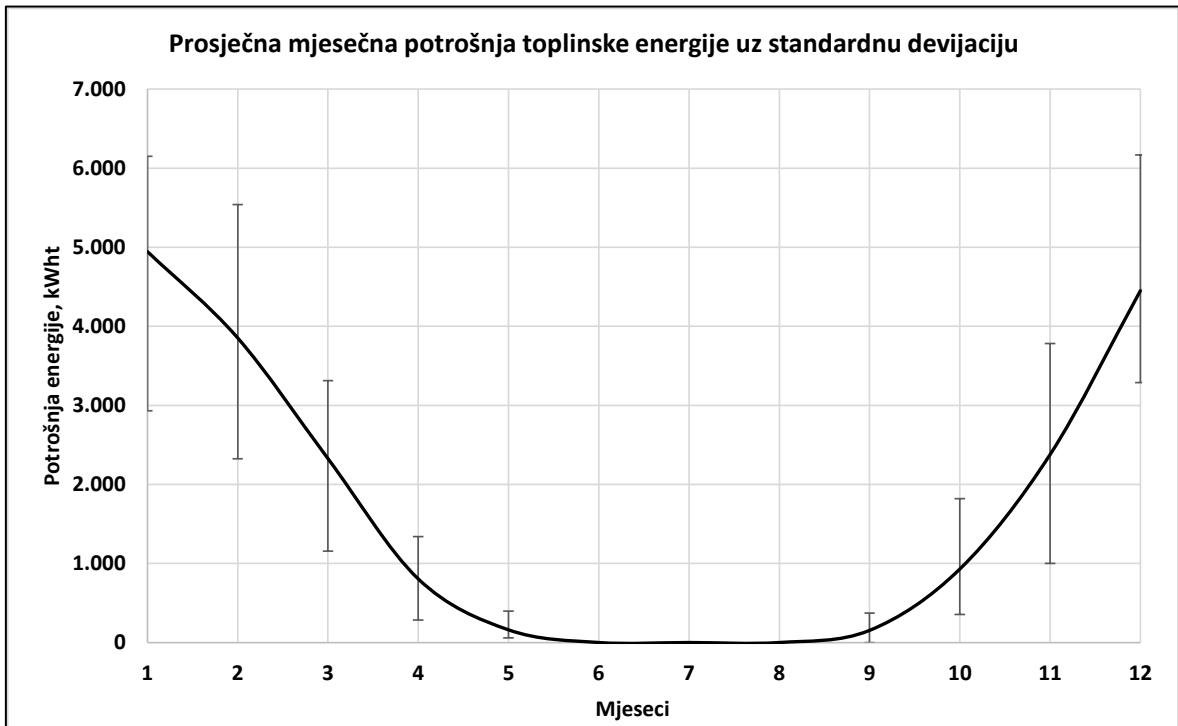
Grafovi na Slikama 4-1 i 4-3 napravljeni su tako da je izračunata prosječna vrijednost temperature i potrošnje toplinske energije za svaki mjesec, te se ta vrijednost nalazi okomito iznad broja mjeseca. Krivulja prosječnih mjesečnih temperatura dobivena je spajanjem točaka u pripadnoj godini u glatke linije.

Slika 4-2 prikazuje učestalost pojavljivanja satnih temperatura na području grada Zagreba u prosječnoj godini. Graf pojavljivanja satnih temperatura zraka pokazuje da vrijednosti od -

2°C do 4°C dobro odvajaju bazno od vršnog opterećenja, te se u tom intervalu treba tražiti optimalna bivalentna točka.



Slika 4-2 Prikaz raspodjele satnih temperatura za grad Zagreb u prosječnoj godini.

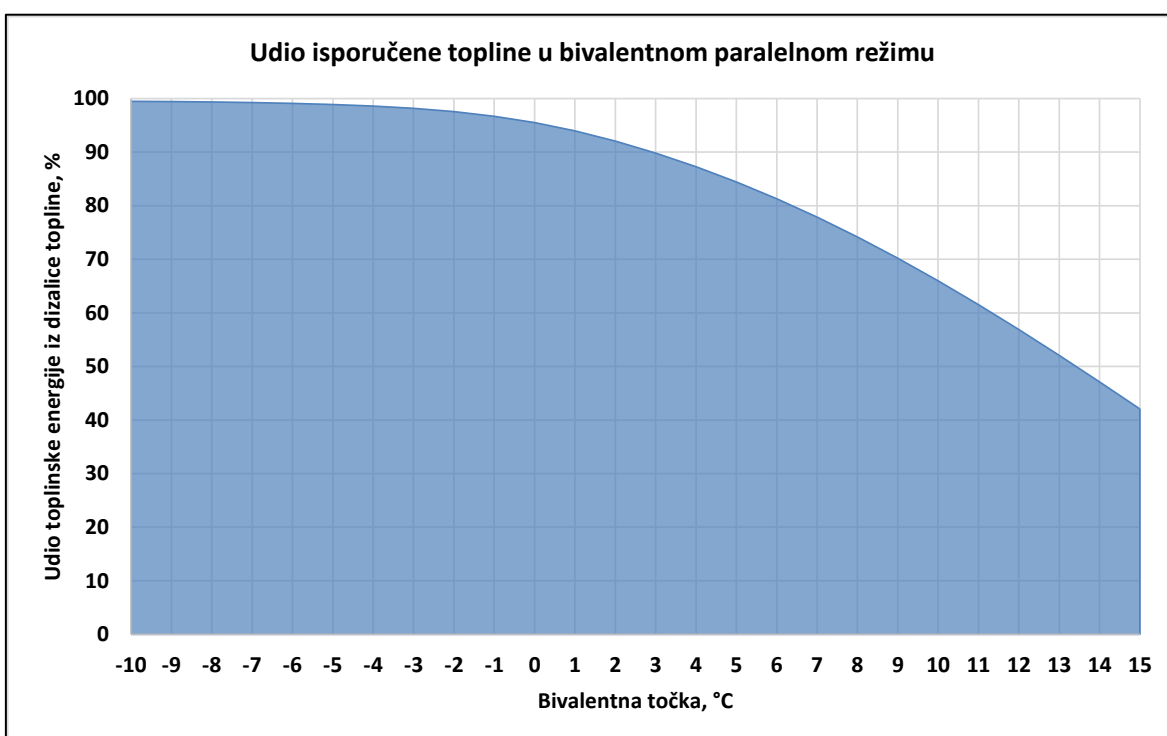


Slika 4-3 Prikaz mjesečne potrošnje energije uz standardnu devijaciju

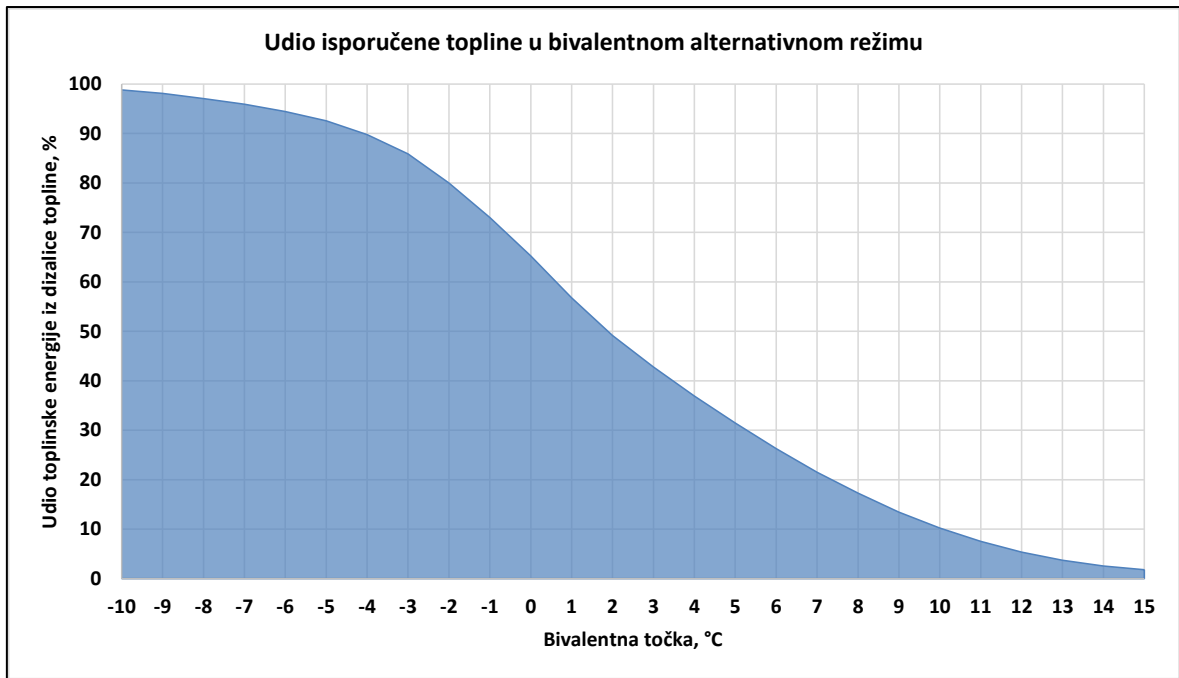
Kao i temperature zraka, mjesečna potrošnja toplinske energije značajno se mijenja od godine do godine. Vrijednosti prosječne vanjske temperature zraka i potrošene toplinske energije u obrnuto su proporcionalnom odnosu.

4.2 Proizvodnja topline pojedinog sustavu prema točki bivalentcije

U ovom poglavlju pokazati ćemo kako promjena vrijednosti bivalentne točke utječe na postotni udio isporučene toplinske energije u hibridnom sustavu. U hibridnom sustavu analiziranom u ovom radu, toplinsku energiju isporučuju dizalica topline i plinski kotao.



Slika 4-4 Prikaz udjela isporučene topline pomoću dizalice topline prema točki bivalentcije za bivalentni paralelni režim

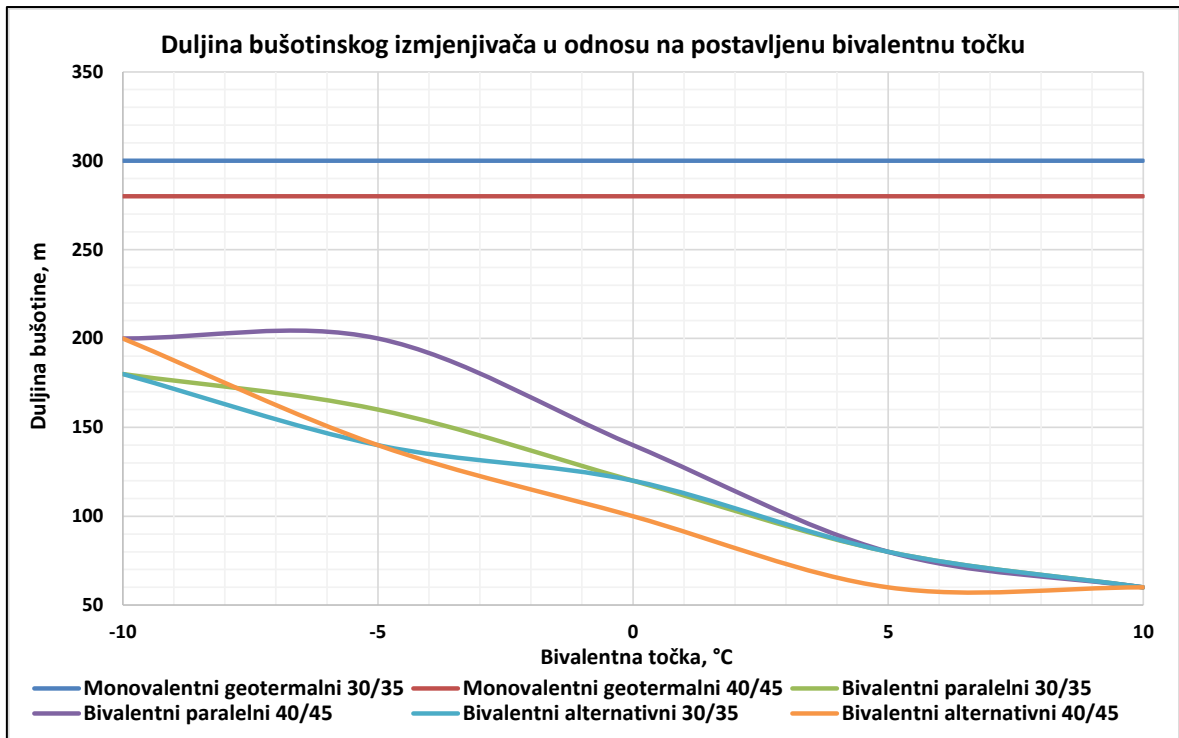


Slika 4-5 Prikaz udjela isporučene topline pomoću dizalice topline prema točki bivalentnosti za bivalentni alternativni režim

Kod bivalentnog alternativnog režima udio isporučene energije kroz geotermalni način rada, odnosno dizalicu topline, brže opada s porastom točke bivalentnosti nego je to slučaj s paralelnim režimom grijanja. Blaži, odnosno strmiji pad isporučene toplinske energije u paralelnom i alternativnom režimu grijanja rezultat je načina njihovog rada. Bivalentni paralelni režim rada, nakon što vanjska temperatura zraka padne ispod točke bivalentnosti, nastavlja isporučivati toplinu s dizalicom topline u kombiniranom radu s plinskim kotlom. Alternativni režim rada nakon što se sustav nađe ispod točke bivalentnosti u cijelosti isključuje dizalicu topline, što rezultira naglim padom isporučene toplinske energije s porastom vrijednosti bivalentne točke, vidljivim na Slici 4-5.

4.3 Duljina bušotinskog izmjenjivača

Duljina bušotinskog izmjenjivača funkcija je odabranog režima rada, bivalentne točke i vrijednosti vanjske temperature zraka na koju je sustav dimenzioniran. Također, u ovom je radu postavljen uvjet maksimalnog crpljenja toplinske energije po metru bušotine kako EST vrijednost nikada ne bi pala ispod 0°C.

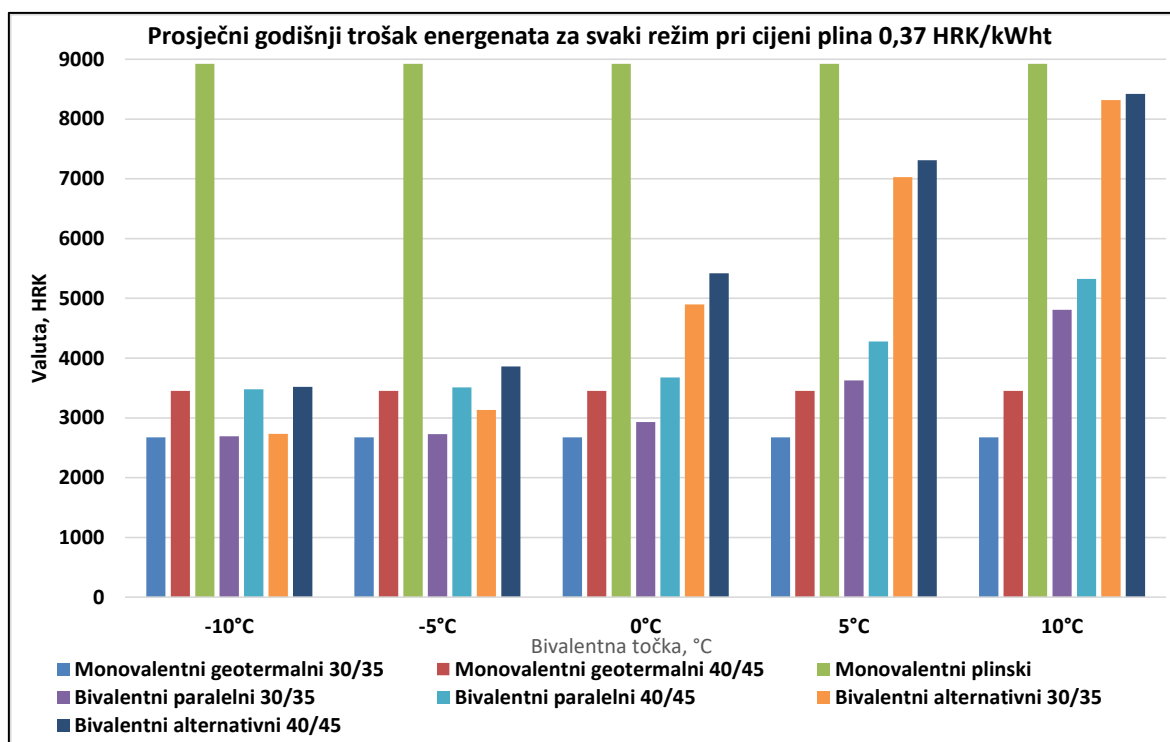


Slika 4-6 Prikaz potrebnih duljina bušotinskog izmjenjivača u odnosu na postavljenu bivalentnu točku

Monovalentni sustavi ne mijenjaju duljinu bušotinskog izmjenjivača s pomakom bivalentne točke kako je oni nemaju, odnosno, moraju biti dimenzionirani za pokrivanje vršne potrošnje. Hibridnim sustavima potreban je manja duljina bušotinskog izmjenjivača s porastom bivalentne točke, te alternativni pokazuje strmiji pad od paralelnog režima sukladno Slikama 4-4 i 4-5.

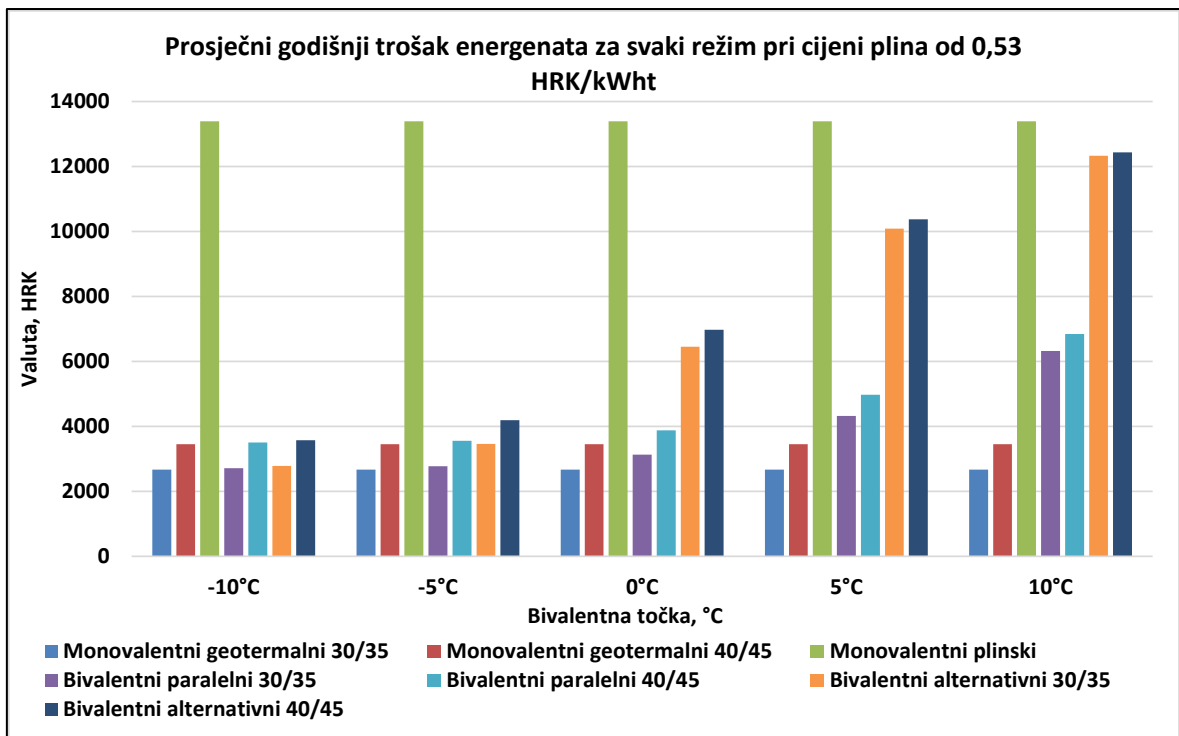
5 Analiza režima grijanja

5.1 Trošak energenata za svaki režim



Slika 5-1 Prikaz troška energenata za svaki režim u prosječnoj godini pri promjenjivoj bivalentnoj točki i pretpostavljenom cijenom plina od 0,37 HRK/kWh

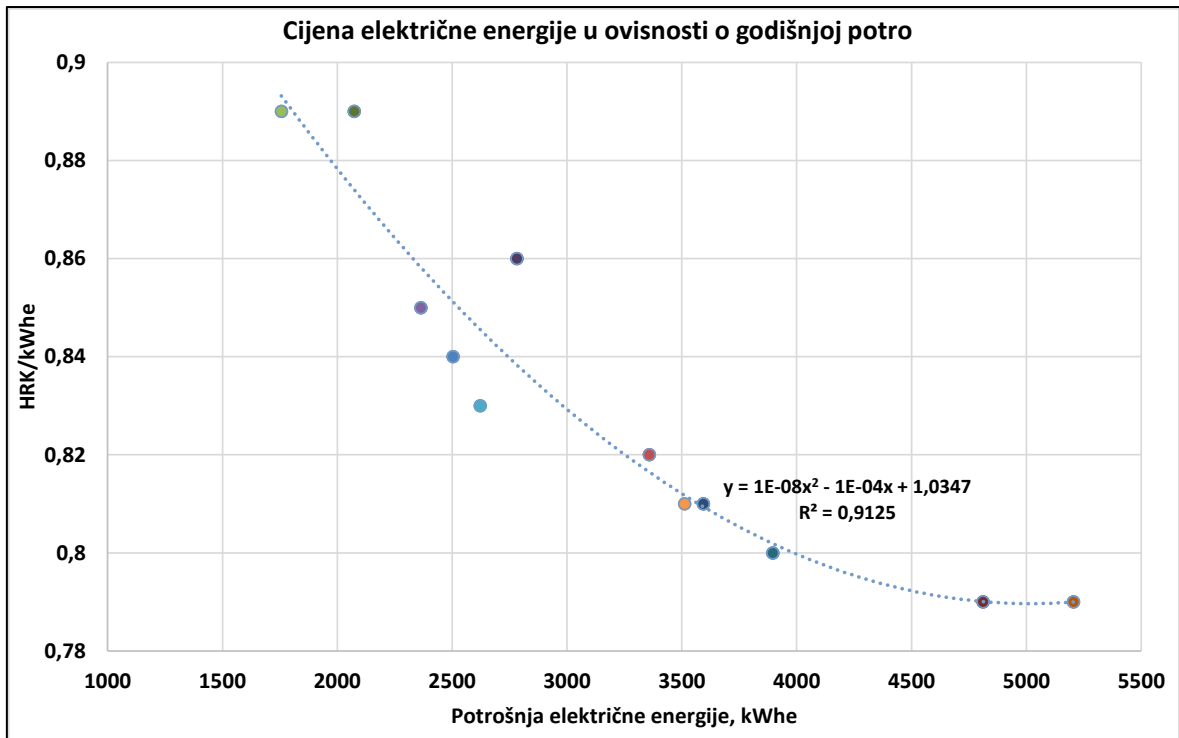
Trošak energenata u svakom režimu rada zbrojen je kroz razdoblje od petnaest godina te je sveden na srednju vrijednost za svaki režim. Značaj ovih rezultata je upravo u dugom periodu promatranja čime su kompenzirane potencijalne greške pojavljivanja iznadprosječno toplih ili hladnih godina koje bi značajno utjecale na izlazne rezultate. Rezultati su dobiveni pri bivalentnim točkama od -10,-5,0,5 i 10 °C sa cijenom plina od 0,37 HRK/kWh i 0,53 HRK/kWh. Slika 5-1 prikazuje analizu sa cijenom plina od 0,37 HRK/kWh koja odgovara cijeni plina u Hrvatskoj na početku 2017. godine. Slika 5-2 prikazuje istu analizu sa cijenom plina od 0,53 HRK/kWh koja odgovara prosječnoj cijeni prirodnog plina u Europskoj uniji. Analiza pri cijeni plina od 0,53 HRK/kWh provedena je zbog budućih efekta liberalizacije hrvatskog tržišta plina u pogledu izjednačavanja cijena hrvatskog plina s europskim prosjekom.



Slika 5-2 Prikaz troška energenata za svaki režim u prosječnoj godini pri promjenjivoj bivalentnoj točki i pretpostavljenom cijenom plina od 0,53 HRK/kWh

Na grafu je vidljiva značajna razlika u godišnjim operativnim troškovima između promatranih režima grijanja. Najjeftiniji prema potrošenim energentima je monovalentni geotermalni režim 30/35°C, prate ga bivalentni paralelni i alternativni režimi dok je konvencionalni režim grijanja na plin na začelju po ekonomičnosti.

Cijena plina od 0,37 HRK/kWh u analizi prikazanoj na Slici 5-1 prikazuje situaciju s početka 2017. godine. Bazna cijena plina kojeg prodaje Gradska plinara Zagreb iznosi 0,37 HRK/kWh. Cijena električne energije znatno varira ovisno o potrošnji, a kako potrošnja električne energije ovisi o režimu grijanja, modelirana je krivulja bijelog dvotarifnog HEP-ovog načina plaćanja ovisnosti cijene električne energije o potrošnji u svrhu što točnije ekonomske analize. Krivulja je prikazana na Slici 5-3.



Slika 5-3 Modelirana krivulja ovisnosti cijene električne energije o godišnjoj potrošnji po bijelom dvotarifnom HEP-ovom modelu

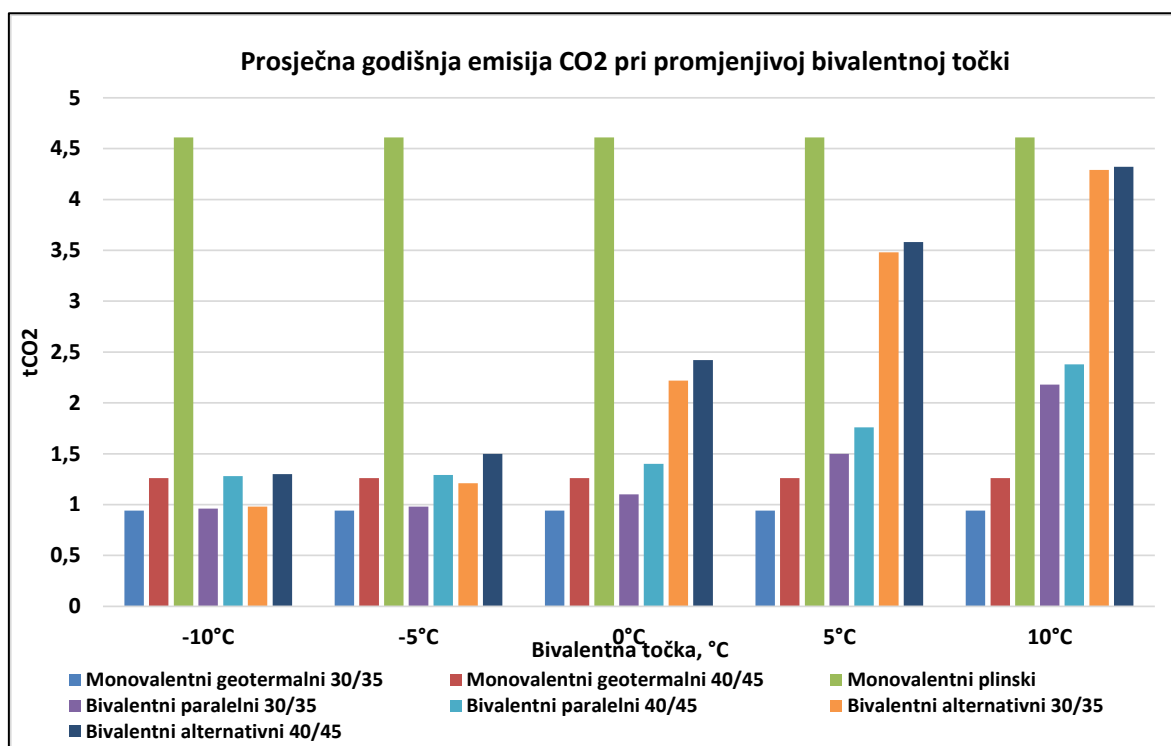
Točke na Slici 5-3 predstavljaju pravu cijenu električne energije u HRK/kWh za njima pridruženu godišnju potrošnju, dok krivulja predstavlja aproksimiranu funkciju koja opisuje ovisnost potrošnje i cijene električne energije.

5.2 Emisije ugljičnog dioksida za svaki režim

Kako potrošnja toplinske energije varira od godine do godine tako varira i pripadajuća emisija ugljičnog dioksida. Za analizu emisija ugljičnog dioksida korištena je prosječna potrošnja toplinske energije u razdoblju od 1999. do 2013. godine te vrijednosti bivalentne točke od $-5,0,5$ i 10°C . Emisijski faktor ugljikovog dioksida za prirodni plin je $54,5 \text{ kg/GJ}$, dok je u programu *RETSscreen* izračunat emisijski faktor za svaki potrošeni MWh električne energije za RH. Potrošnja električne energije ne emitira ugljični dioksid ali ga emitiraju postrojenja koja ju proizvode. U Hrvatskoj je u 2014. godini emitirano $0,288 \text{ tCO}_2$ za svaki MWh potrošene električne energije te je ta vrijednost uzeta kao referentna za daljnju analizu.

Tablica 5-1 Proračun energetskeg miksa za 2014. godinu u programu RETScreen

Energent	Udio [%]	Emisijski faktor CO ₂ , [kg/GJ]	Emisijski faktor CH ₄ , [kg/GJ]	Emisijski faktor N ₂ O, [kg/GJ]	Učinkovitost proizvodnje ele. energije [%]	Gubici pri transportu ele.energije [%]	Emisijski faktor, [tCO ₂ /MWh]
Prirodni plin	8,4%	54,5	0,0040	0,0010	45%	11,9%	0,498
Ugljen	17,5%	95,8	0,0150	0,0030	30%	11,9%	1,322
Hidro	67,0%	0,0	0,0000	0,0000	100%	11,9%	0,000
Nuklearna	0,0%	0,0	0,0000	0,0000	30%	11,9%	0,000
Mazut	1,7%	73,3	0,0020	0,0020	35%	11,9%	0,864
Vjetar	5,4%	0,0	0,0000	0,0000	100%	11,9%	0,000
Energetski miks	100%	78,9	0,0109	0,0023		11,9%	0,288



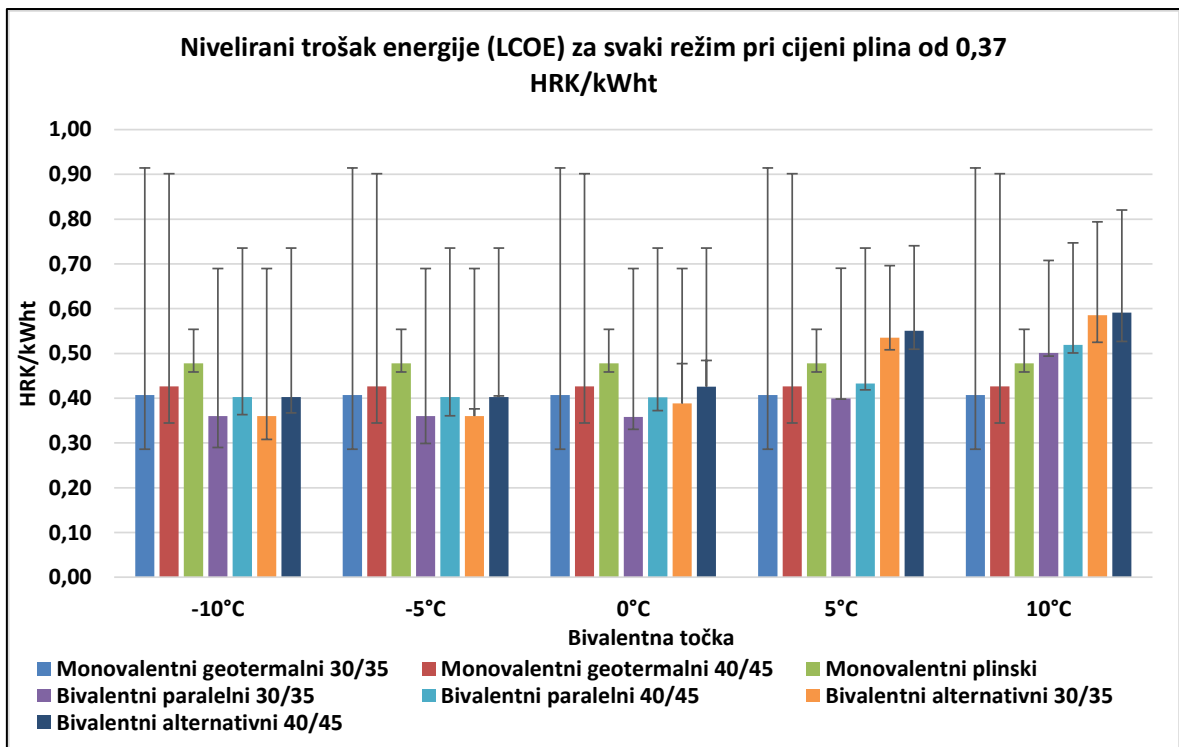
Slika 5-4 Prikaz godišnje emisije tCO_2 pri promjenjivoj bivalentnoj točki za pojedini režim u prosječnoj godini

Vidljiva je značajna razlika u emisiji tCO_2 u različitim režimima grijanja. Republika Hrvatska značajni dio svoje proizvodnje električne energije dobiva iz hidroelektrana što se očituje u niskoj emisiji stakleničkih plinova u potpuno električnom modusu grijanja kakvog

ima monovalentan geotermalni režim. Električna energija iz nuklearne elektrane Krško tretira se kao uvoz te kao takva nije uzeta u obzir u proračunu.

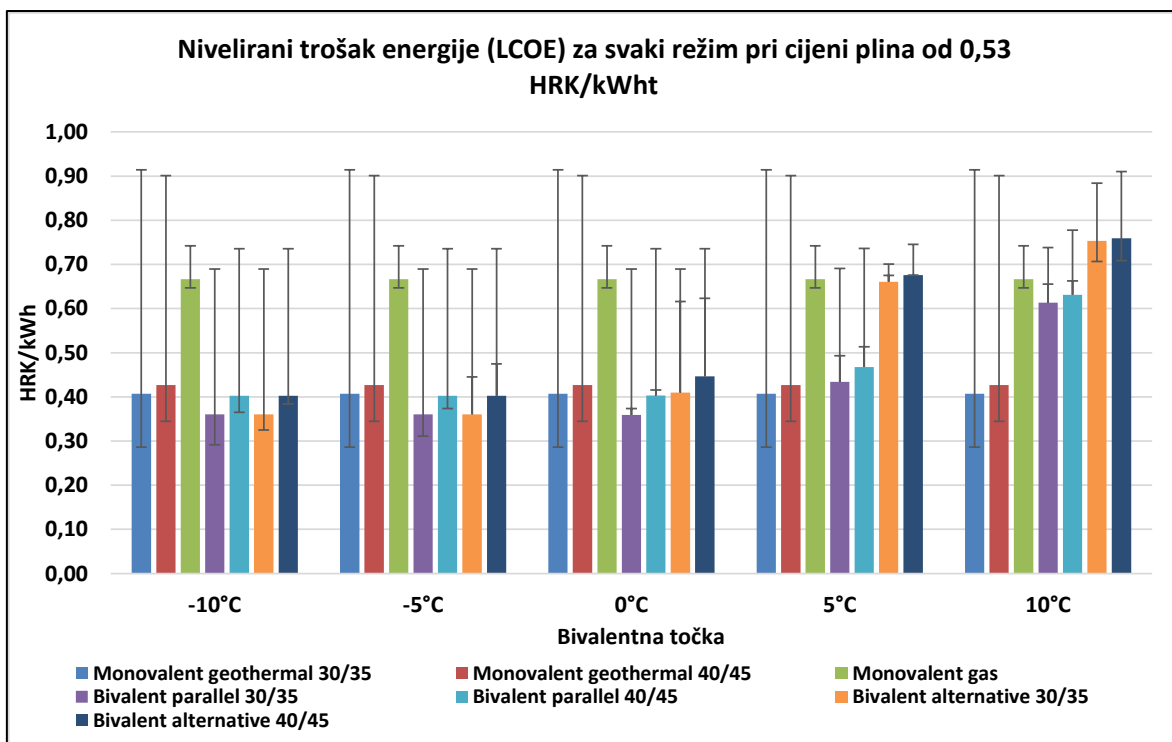
5.3 LCOE analiza

Nivelirani trošak energije (*Levelized Cost of Energy, engl.*) pokazuje cijenu proizvodnje energije u nekom sustavu te predstavlja pojam koji obuhvaća ukupnu proizvedenu energiju i troškove kroz radni vijek nekog energetskeg postrojenja. Diskontiranjem energiju i troškove svodi na sadašnju vrijednost te nam pokazuje cijenu toplinske energije generirane u nekom energetskeg sustavu (HRK/kWh). Provedena je pojednostavljena LCOE analiza koja uzima u obzir: kapitalne i operativne troškove, održavanje, cijenu energenata, diskontnu stopu od 3% i pretpostavljeni radni vijek sustava od 30 godina. Provedena je analiza pri bivalentnim točkama od -10,-5,0,5 i 10°C. Slika 5-5 prikazuje analizu sa cijenom plina od 0,37 HRK/kWh koja odgovara cijeni plina u Hrvatskoj na početku 2017. godine. Slika 5-6 prikazuje istu analizu sa cijenom plina od 0,53 HRK/kWh koja odgovara prosječnoj cijeni prirodnog plina u Europskoj uniji. Analiza pri cijeni plina od 0,53 HRK/kWh, provedena je zbog budućih efekta liberalizacije hrvatskog tržišta plina u pogledu izjednačavanja cijena hrvatskog plina s europskim prosjekom.



Slika 5-5: Prikaz LCOE analize za pojedini režim u prosječnoj godini pri promjenjivoj bivalentnoj točki i s pretpostavljenom cijenom plina od 0,37 HRK/kWh

Devijacija prikazana na Slikama 5-3-1 i 5-3-2 odnose se na nivelirani trošak energije u slučaju pojavljivanja najhladnije i najtoplije godine. Najhladnija i najtoplija godina definirane je kao godine u kojima se pojavljuju sve najniže odnosno najviše satne temperature zabilježene u razdoblju od 1999. do 2013. godine.



Slika 5-6 Prikaz LCOE analize za pojedini režim u prosječnoj godini pri promjenjivoj bivalentnoj točki i s pretpostavljenom cijenom plina od 0,53 HRK/kWh

Na provedenu LCOE analizu značajno utječe duljina bušotinskog izmjenjivača koja je zasebno definirana za svaki režim, te oprema i priključci koje je potrebno instalirati za pojedini sustav. Kako primjena hibridnih sustava ima jedino smisla kod renoviranja starijih zgrada za koje se pretpostavlja da su spojene na plinsku mrežu, iz njihovih investicija uklonjeni su troškovi plinskog priključka, brojila i ostalih pripadnih radova vezanih uz plinske instalacije.

6 Zaključak

Pri sadašnjoj cijeni plina od 0,37 HRK/kWh, LCOE analiza pokazala je da su hibridni sustavi na dulji rok ekonomski nepovoljnija opcija od konvencionalnih monovalentnih režima pri projektiranju novih objekata. Prema količini emisija stakleničkih plinova i operativnim troškovima, nalaze se između najpovoljnijih monovalentnih geotermalnih i najnepovoljnijeg monovalentnog plinskog režima. Stoga hibridni sustavi nisu konkurentno rješenje za grijanje novih zgrada ali mogu pronaći svoju primjenu pri renoviranju starijih objekata koji su već spojeni na plinsku mrežu, imaju plinske instalacije i povećane toplinske gubitke. Kod obnavljanja starih zgrada hibridni sustavi mogu ponuditi smanjenje operativnih troškova korištenjem dizalice topline za pokrivanje bazne potrošnje i plinskog kotla za podmirivanje vršnih opterećenja.

Ako se LCOE analiza provede uz pretpostavku cijene plina od 0,53 HRK/kWh, koja odgovara europskom prosjeku i mogućoj budućoj cijeni u Hrvatskoj zbog liberalizacije tržišta plina, bivalentni paralelni režimi postaju ekonomičniji na dugi rok od monovalentnog plinskog režima dok bivalentni alternativni režimi ostaju financijski nekonkurentni. Režim s najnižim operativnim troškovima i emisijom stakleničkih plinova je monovalentni geotermalni 30/35°C režim, te predstavlja ekonomski i ekološki najprihvatljivije rješenje za grijanje prostora. Nedostatak ovog režima je visoka početna investicija, no LCOE analiza pokazuje da u periodu od 30 godina uštede premašuju ulaganja te je sustav u duljem vremenskom razdoblju ekonomski povoljan.

Znanstveni doprinos ovog rada je analiza promjenjive bivalentne točke na ekonomsku isplativost i ekološku prihvatljivost projekata baziranih na hibridnom sustavu grijanja. Prateći opisani tijekom analize, moguće ju je ponoviti za svaki objekt u bilo kojoj klimi uz promjenu parametara vezanih za fiziku zgrade, geologiju tla i klimatske karakteristike promatranog područja.

Popis literature

- 1) Kurevija, T.; Macenić, M.; Borović, S. 2017. *Impact of grout thermal conductivity on the long-term efficiency of the ground-source heat pump system*. Elsevier: Sustainable Cities and Society, 2017/31, str. 1-11.
- 2) Kurevija, T.; Kapuralić, J.; Macenić, M.; 2016. *Comparing seasonal performance factor of different heat pump systems for residential HVAC in the Dfb climate area of Croatia*. Conference Paper
- 3) U.S. Department of Energy, Office of Indian Energy. *Levelized Cost of Energy (LCOE)*
URL: <https://energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/LCOE.pdf> (08.2015.)
- 4) Eurostat. *Energy Price Statistics*. URL: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics#Natural_gas_prices_for_household_consumers (24.01.2017)
- 5) Jiang, P.X.; Zhang, F.Z.; Xu, R.N.; 2017. *Thermodynamic analysis of a solar-enhanced geothermal hybrid power plant using CO₂ as working fluid*. Applied Thermal Engineering, Volume 116, April 2017, Pages 463-472
- 6) Cardemil, J.M.; Cortes, F.; Diaz, A.; Escobar, R.; 2016. *Thermodynamic evaluation of solar-geothermal hybrid power plants in northern Chile*. Energy Conversion and Management, Volume 123, 1 September 2016, Pages 348-361
- 7) DiPippo, R.; 2016. *Combined and hybrid geothermal power systems*. Geothermal Power Generation, 2016, Pages 391-420
- 8) Liu Q.; Shang, L.; Duan, Y.; 2016. *Performance analyses of a hybrid geothermal-fossil power generation system using low-enthalpy geothermal resources*. Applied Energy, Volume 162, 15 January 2016, Pages 149-162
- 9) Ayub, M.; Mitsos, A.; Ghasemi, H.; 2015. *Thermo-economic analysis of a hybrid solar-binary geothermal power plant*. Energy, Volume 87, 1 July 2015, Pages 326-335
- 10) Melikoglu, M.; 2017. *Geothermal energy in Turkey and around the World: A review of the literature and an analysis based on Turkey's Vision 2023 energy targets*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 76, September 2017, Pages 485-492
- 11) Sutra, E.; Spada, M.; Burgherr, P.; 2017. *Chemicals usage in stimulation processes for shale gas and deep geothermal systems: A comprehensive review and*

- comparison*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 77, September 2017, Pages 1-11
- 12) Islam, S.; Dincer, I.; 2017. *Development, analysis and performance assessment of a combined solar and geothermal energy-based integrated system for multigeneration*. Solar Energy, Volume 147, 1 May 2017, Pages 328-343
- 13) Noorollahi, Y. Taghipoor, S.; Sajadi, B.; 2017. *Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells*. Geothermics, Volume 67, May 2017, Pages 66-75
- 14) Mohammadi, A.; Mehrpooya, M.; 2017. *Energy and exergy analyses of a combined desalination and CCHP system driven by geothermal energy*. Applied Thermal Engineering, Volume 116, April 2017, Pages 685-694
- 15) Cakici, D.M.; Erdogan, A.; Colpan, C.O.; 2017. *Thermodynamic performance assessment of an integrated geothermalpowered supercritical regenerative organic Rankine cycle and parabolic trough solar collectors*. Energy, Volume 120, 1 February 2017, Pages 306-319

Sažetak

Modeliranje hibridnog sustava geotermalne dizalice topline i plinskog kotla u funkciji klimatskih parametara grada Zagreba

Boris Klabučar

U ovom radu je prezentiran model rada hibridnog sustava grijanja s dizalicom topline spojene na bušotinski izmjenjivač i kotla na prirodni plin u funkciji klimatskih parametara grada Zagreba. Analiziran je rad bivalentnog paralelnog i alternativnog režima rada, te je pokazano kako se mijenja minimalni nivelirani trošak energije i količina emisije stakleničkih plinova s obzirom na odabrani režim i odabrane bivalentne temperature kao parametra. Također su za potrebe usporedbe prikazani i rezultati za uobičajene monovalentne sustave grijanja, bilo da se radi o dizalici topline ili plinskom kotlu. Rezultati pokazuju veliki raspon rezultata za nivelirani trošak s obzirom na raspon ulaznih vanjskih temperatura, iako je za različite cijene plina vidljivo da bivalentni paralelni režim s povratom/odlazom tople vode od 30/35 °C ostvaruje najniži nivelirani trošak do bivalentne temperature od 0 °C. S druge strane, najnižu emisiju ugljičnog dioksida ima monovalentni geotermalni sustav s istim temperaturama povratne i odlazne vode za grijanje.

Ključne riječi: hibridni geotermalni sustav grijanja; monovalentni režim rada; bivalentni režim rada; nivelirani trošak energije

Summary

Designing hybrid geothermal system with ground source heat pump and gas boiler: Case study on Zagreb climate area

Boris Klabučar

In this work a model of the hybrid heating system consisting of geothermal heat pump and gas boiler has been presented for the climate area of Zagreb city. A geothermal heat pump is connected to the geothermal borehole heat exchanger. The bivalent parallel and alternative mode has been analysed by the criteria of levelized cost of energy and greenhouse gas emissions with the use of different pre-selected bivalent temperature in each mode of operation. These results have been compared to the more conventional monovalent heating systems, the geothermal heat pump and gas heating system. The results for levelized cost are dispersed over the mean value which indicates high sensitivity to input ambient temperature. For different costs of gas, the bivalent parallel regime with the inflow/outflow temperatures of 30/35 °C results in the lowest levelized cost of energy up to the bivalent temperature of 0 °C. On the other hand, the lowest emission of carbon dioxide is obtained with the monovalent geothermal system with the same inflow/outflow temperatures.

Keywords: hybrid geothermal heating system; monovalent regime; bivalent regime; levelized cost of energy